

GaAs (110)量子阱的电子自旋弛豫*

刘林生^{1,2,3} 刘肃¹ 王文新^{2,†} 赵宏鸣² 刘宝利² 高汉超² 蒋中伟²
王佳² 黄庆安^{1,3} 陈弘² 周均铭²

(1 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000)
(2 中国科学院物理研究所凝聚态国家实验室, 北京 100080)
(3 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 采用固态源分子束外延的方法在 GaAs(110)取向衬底上生长了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构. 对样品进行了低温光致发光谱和时间分辨光致发光谱的测量, 结果表明激发功率和激发波长对室温下量子阱内电子的自旋弛豫时间有强烈的影响. 对于常见的 GaAs(100)量子阱起支配作用的 D'yakonov-Perel' (DP) 自旋弛豫机制, 在 GaAs (110)量子阱材料里被充分地抑制了. 对于缺失了 DP 相互作用的 GaAs (110)多量子阱, 电子-空穴相互作用对自旋弛豫时间随激发功率变化有重要的影响.

关键词: 电子自旋弛豫; 多量子阱; 分子束外延

PACC: 6740F; 6322; 6855

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)06-0856-04

1 引言

自旋电子学 (spintronics or spin-electronics) 是上世纪 90 年代末以来飞速发展起来的新兴学科^[1~5]. 与传统的半导体电子器件相比, 自旋电子器件具有非挥发性、低功耗和高集成度等优点. 未来的电子自旋器件要利用半导体及其量子阱结构中的电子自旋的极化态作为信息载体和逻辑位, 实现自旋开关和量子计算^[6]. 这就要求电子自旋极化态具有适当的寿命和空间输运距离^[7]. 人们对半导体中的电子弛豫现象进行了许多研究, 从理论上主要提出了下面几种机制: (1) Elliot-Yaffet 机制^[8,9], 这种弛豫机制对于窄禁带宽度、大自旋轨道分裂和高杂质掺杂浓度的半导体材料是重要的; (2) Bir-Aronov-Pikus (BAP) 机制^[10], 这种弛豫机制对于低温下 p 型半导体有重要的影响; (3) D'yakonov-Perel' (DP) 机制, 目前人们普遍认为室温下缺失中心反演对称性的 III-V 族闪锌矿材料的导带电子自旋弛豫机理为 DP 机制^[6,11].

近年来, 国外一些小组^[12~14] 的研究表明在 GaAs (110) 衬底上生长的 GaAs/AlGaAs 多量子阱内的电子自旋弛豫时间比在 GaAs (100) 衬底上生长量子阱内的长 1~2 个数量级. 在 GaAs (110) 衬底上生长的量子阱中由于体反转非对称性引起的自

旋轨道耦合产生的有效磁场沿生长方向, 因此有效地抑制了 DP 相互作用^[13]. 在缺失 DP 相互作用的情况下, 有关电子自旋弛豫时间与激发波长和功率的关系尚缺乏理论和实验的研究. 本文采用分子束外延技术在 GaAs (110) 衬底上生长了高质量的量子阱样品, 并在室温下用时间分辨光致发光谱 (time-resolved photoluminescence, TRPL) 的方法测量了量子阱内电子自旋弛豫时间随激发波长 λ_{exc} 和激发功率 P_{exc} 的变化曲线.

2 实验

本实验样品是用 VG 公司 V80H 型分子束外延设备生长的. 衬底为 AXT (American Xtal Technology) 公司 GaAs (110) 晶向的半绝缘衬底. 固态 As 源裂解区温度为 850°C, 使样品在 As₂ 模式下生长. 衬底的脱膜温度为 550°C (经红外测温仪校正). 当反射式高能电子衍射仪 (reflection high energy electron diffraction, RHEED) 屏幕上呈现清晰的 (1×1) 表面再构图案时, 表明衬底氧化膜完全脱附, 衬底降到 470°C 生长 500nm 的 GaAs 缓冲层. 经过优化生长条件, 采用 As₂/Ga 束流比约为 30 和生长速率为 0.5μm/h 来生长多量子阱区^[15].

样品包含 20 个量子阱, GaAs 阱宽 8nm, Al_{0.4}-Ga_{0.6}As 垒宽 27nm. 样品在反转界面 (AlGaAs 上生

* 国家自然科学基金 (批准号: 10504030), 中国科学院知识创新工程和甘肃省自然科学基金 (批准号: 3ZS051-A25-034) 资助项目

† 通信作者. Email: wxwang@aphy. iphy. ac. cn

2007-02-14 收到, 2007-04-03 定稿

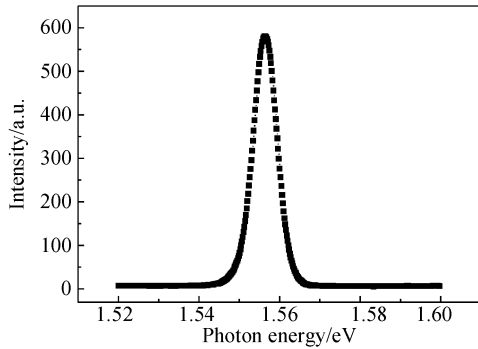


图 1 GaAs(110)衬底上生长的 GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 多量子阱在 19K 的 PL 光谱

Fig. 1 Photoluminescence for GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As (110) multiple quantum wells at 19K

长 GaAs 的界面)中断 1min,使得生长表面的 Ga, Al 原子能够有时间在表面迁移,这样可以显著地降低界面的粗糙度^[16,17].利用时间分辨光致发光谱的方法^[18,19]测量了室温下不同激发波长和功率下量子阱内的电子自旋弛豫时间.测量设备由自锁模钛蓝宝石激光器产生光脉冲(1.5ps, 80MHz),并配备时间分辨率为 30ps 的 Hamamatsu S1 型光阴极条纹相机记录时间分辨光致发光谱.激发光为圆偏振光(σ^+),激发功率从 1 到 50mW,激发波长从 790 到 838nm,激发光斑直径 50 μ m.低温光致发光谱(PL)测量的激光光源为发光波长 632.8nm 的 He-Ne 激光器,激发功率为 4mW,使用的 SpectraSense 光谱仪分辨率为 0.01nm,测量温度为 19K.

3 结果与讨论

图 1 是 GaAs (110)衬底上生长的阱宽 8nm,垒宽 27nm, GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 多量子阱样品在 19K 的 PL 光谱. PL 光谱的半高宽(FWHM)为 6.0meV,比文献[14]中的 6.5 meV(10K)要小.这个结果接近于文献[20]中假设量子阱界面起伏为单原子层时的理论计算结果(5meV).这主要是由于我们优化了生长条件,如采用下界面中断,用 As₂ 模式代替 As₄ 模式生长等.采用下界面中断,使得生长表面的 Al 原子能够有时间再分布,可以显著地降低界面的粗糙度^[16,17].用 As₂ 模式代替 As₄ 模式生长,可以获得比较光滑的生长表面^[21].由图 1 可以看出量子阱材料有很高的质量.

图 2 是 GaAs(110)衬底上生长的 GaAs/Al_{0.4}-Ga_{0.6}As 多量子阱室温下电子自旋弛豫时间随激发功率变化的曲线和拟合曲线.由曲线可以看出,自旋弛豫时间随着激发功率的提高而降低.在对数坐标中,这种变化呈现很好的线性关系.软件拟合得出

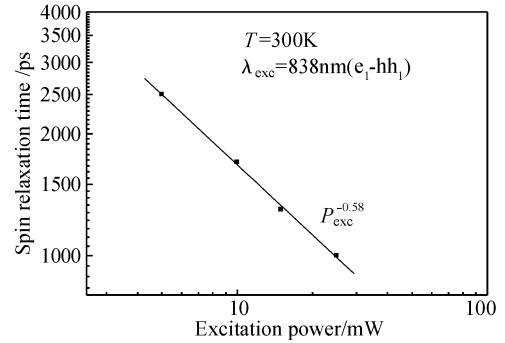


图 2 GaAs(110)衬底上生长的 GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 多量子阱室温下电子自旋弛豫时间随激发功率 P_{exc} 变化和拟合曲线(激发波长为 838nm.)

Fig.2 Power dependence of the corresponding spin relaxation time of the e_1 - hh_1 transition for GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As (110) multiple quantum wells at room temperature The solid line is the fitting curve.

$\tau_s \propto P_{exc}^{-0.58}$. 这个结果与文献[12,22]中的类似.文献中不掺杂样品的自旋弛豫时间在室温时低的激发功率时下降较缓,大的激发功率时在对数坐标下呈现跟本文相似的线性关系.对不掺杂的 GaAs(110)量子阱材料,由于体反转非对称性引起的自旋轨道耦合产生的有效磁场沿生长方向,DP 弛豫机制得到了充分抑制,电子-空穴相互作用(BAP 机制)变得重要^[12,13].在低激发功率下阱内产生的电子-空穴对数较少,对自旋反转的影响不大,自旋弛豫时间随激发功率增大下降较慢.在高激发功率下阱内产生大量的电子-空穴对,电子-空穴相互作用变得明显.本文的激发功率较大,所以没有观察到文献[22]中自旋弛豫时间随激发功率下降较缓的部分.BAP 理论认为电子受空穴的散射会导致自旋的反转,自旋弛豫时间与空穴的浓度成反比, $\tau_s \propto N_h^{-1}$ ^[23].在不掺杂的 GaAs(110)量子阱里,空穴主要是由光激发产生的,由于光激发产生的空穴浓度与光的激发功率成正比,则自旋弛豫时间应也与激发功率 P_{exc} 成反比.在图 2 中,我们用软件拟合曲线得到的关系是 $\tau_s \propto P_{exc}^{-0.58}$.这说明除了电子-空穴相互作用对室温下 GaAs(110)的自旋弛豫时间有重要影响外,还存在其他影响自旋弛豫的机制需要我们进一步地研究.

在图 2 中,激发功率为 5mW 时,自旋弛豫时间达到了 2500ps,说明我们采用的下界面中断和 As₂ 生长模式对提高量子阱质量是很有效的.关于这些优化措施对自旋弛豫时间的影响,我们另文进行了详细的研究^[24].

图 3 是 GaAs(110)衬底上生长的 GaAs/Al_{0.4}-Ga_{0.6}As 多量子阱样品在室温下电子自旋弛豫时间和受激发的导带电子初始自旋极化率随激发波长的变化时间分辨光致发光谱测量曲线.图中 e_1 - hh_1 , e_1 - lh_1

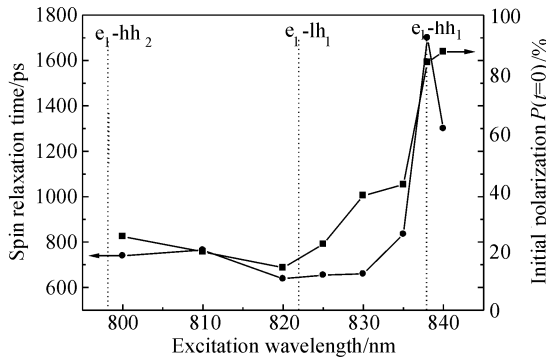


图3 GaAs(110)衬底上生长的GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As多量子阱室温下电子自旋弛豫时间和受激发的导带电子初始自旋极化率随激发波长的变化曲线. 激发功率为10mW.

Fig. 3 Excitation wavelength dependence of the initial polarization (full square) and spin relaxation time (full circle) for GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As (100) multiple quantum wells at room temperature. The excitation power is 10mW.

和 e_1-hh_2 是第1重空穴、第1轻空穴和第2重空穴带到第1导带子带的跃迁,子带边跃迁对应的波长依次为838,822和798nm.圆偏振光激发样品后发出的荧光可以分解为跟激发光偏振相同的圆偏振光 I^+ 和跟激发光偏振相反的圆偏振光 I^- , 初始自旋极化率定义为 $P(0) = (I_0^+ - I_0^-) / (I_0^+ + I_0^-)$ (I_0^+ 和 I_0^- 对应于样品初始受激发时发出荧光的 I^+ 和 I^- 部分).从图中可以看出,共振激发 e_1-hh_1 跃迁时,激发到导带的电子有很高的初始自旋极化率($P(0) > 80\%$),量子阱中的电子自旋弛豫时间也很长($\tau_s > 1.6$ ns).当激发波长小于 e_1-hh_1 共振激发波长时,导带电子初始自旋极化率和量子阱内电子自旋弛豫时间随着激发波长缩短(激发能量增大)而减小.当激发波长到 e_1-lh_1 共振激发波长时,导带电子初始自旋极化率和量子阱内电子自旋弛豫时间分别降到了 $\sim 20\%$ 和 ~ 700 ps.导带电子初始自旋极化率随激发波长缩短(激发能量增大)而减小,归因于同时激发了 e_1-hh_1 和 e_1-lh_1 的跃迁^[25].当激发波长小于 e_1-lh_1 共振激发波长时,会同时激发 e_1-hh_1 , e_1-lh_1 和 e_1-hh_2 跃迁,情况比较复杂,本文不加以讨论.图中激发波长为840nm时,激发能量小于 e_1-hh_1 跃迁能量,受激发到导带中的电子数大大减少.激发波长为840nm时,自旋弛豫时间明显下降,可能与量子阱样品中存在的非故意掺杂的杂质和缺陷等有关.激发能量小于 e_1-hh_1 跃迁能量时, e_1-hh_1 跃迁到导带中电子数很少,杂质和缺陷等的影响变大.关于杂质和缺陷等对量子阱电子自旋弛豫时间的影响,还需要进一步研究.

4 结论

本文采用分子束外延技术生长了高质量的GaAs/AlGaAs(110)多量子阱,并采用时间分辨光致发光光谱研究了GaAs(110)多量子阱自旋弛豫时间随激发功率和激发波长的变化关系.自旋弛豫时间随激发功率增大成指数关系($\tau_s \propto P_{exc}^{-0.58}$)减小,研究表明除了电子-空穴相互作用对此有重要影响外,还存在其他自旋弛豫机制,这个问题需要我们进一步研究.在激发波长小于量子阱 e_1-hh_1 共振跃迁波长时,电子自旋弛豫时间随激发波长的变化基本上与导带电子初始自旋极化率随激发波长的变化趋势一致.当激发波长大于量子阱 e_1-hh_1 共振跃迁波长时,杂质和缺陷等对电子的自旋弛豫产生了很大的影响.

致谢 作者十分感谢法国 INSA TOULOUSE 的 LNMO 实验室 Marie X 教授提供时间分辨光致发光光谱的测量和有益的讨论.

参考文献

- [1] Tanaka M. Spintronics: recent progress and tomorrow's challenges. *J Cryst Growth*, 2005, 278(1~4): 25
- [2] Zutic I, Fabian J, Sarma S D. Spintronics: fundamentals and applications. *Rev Mod Phys*, 2004, 76(2): 323
- [3] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A, et al. Spintronics: a spin-based electronics vision for the future. *Science*, 2001, 294: 1488
- [4] Sun Fengwei, Deng Li, Shou Qian, et al. Femtosecond spectral studies of electron spin injection and relaxation in AlGaAs / GaAs MQW. *Acta Phys Sin*, 2004, 53: 3196 (in Chinese) [孙丰伟, 邓莉, 寿倩, 等. 量子阱中电子自旋注入及弛豫的飞秒光谱研究. *物理学报*, 2004, 53(9): 3196]
- [5] Zou Jianping, Tian Lilin, Yu Zhiping. Simulation of spin-polarized transport in SiGe/Ge/SiGe heterostructure. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(2): 299 (in Chinese) [邹建平, 田立林, 余志平. SiGe/Ge/SiGe 异质结构中自旋极化输运特性的模拟. *半导体学报*, 2005, 26(2): 299]
- [6] Sarma S D, Fabian J, Hu X D, et al. Spin electronics and spin computation. *Solid State Commun*, 2001, 119(4/5): 207
- [7] Wu Yu, Jiao Zhongxing, Lei Liang, et al. Electron spin relaxation and momentum relaxation in semiconductor quantum wells. *Acta Phys Sin*, 2006, 55(6): 2961 (in Chinese) [吴羽, 焦中兴, 雷亮, 等. 半导体量子阱中电子自旋弛豫和动量弛豫. *物理学报*, 2006, 55(6): 2961]
- [8] Yafet Y. Calculation of the g factor of metallic sodium. *Phys Rev*, 1952, 85(3): 478
- [9] Elliott R J. Theory of the effect of spin-orbit coupling on magnetic resonance in some semiconductors. *Phys Rev*, 1954, 96(2): 266
- [10] Fishman G, Lampel G. Spin relaxation of photoelectrons in P-type gallium arsenide. *Phys Rev B*, 1977, 16(2): 820

- [11] Kong Linggang, Liu Xiaoyan, Du Gang, et al. Monte Carlo simulation of in-plane spin-polarized transport in GaAs/GaAlAs quantum well in the three-subband approximation. *Chin Phys*, 2006, 15(3): 654
- [12] Ohno Y, Terauchi R, Adachi T, et al. Spin relaxation in GaAs(110) quantum wells. *Phys Rev Lett*, 1999, 83(20): 4196
- [13] Ohno Y, Terauchi R, Adachi T, et al. Electron spin relaxation beyond D'yakonov-Perel' interaction in GaAs/AlGaAs quantum wells. *Physica E*, 2000, 6(1~4): 817
- [14] Henini M, Karimov O Z, John G H, et al. Gated spin relaxation in (110)-oriented quantum wells. *Physica E*, 2004, 23(3/4): 309
- [15] Cheng Wenqin, Liu Shuang, Zhou Junming, et al. Photoluminescence of (110) modulation-doped GaAs-AlGaAs heterostructures. *Acta Phys Sin*, 1993, 42(9): 1529 (in Chinese) [程文芹, 刘双, 周均铭, 等. (110)取向的调制掺杂 GaAs-AlGaAs 单异质结的光致荧光谱. *物理学报*, 1993, 42(9): 1529]
- [16] Shang X Z, Wang W C, Wu S D, et al. Effects of indium doping on the properties of AlAs/GaAs quantum wells and inverted AlGaAs/GaAs two-dimensional electron gas. *Semicond Sci Technol*, 2004, 19(3): 519
- [17] Leosson K, Jensen J R, Langbein W, et al. Exciton localization and interface roughness in growth-interrupted GaAs/AlAs quantum wells. *Phys Rev B*, 2000, 61(15): 10322
- [18] Lombez L, Braun P F, Carrère H, et al. Spin dynamics in dilute nitride semiconductors at room temperature. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 252115
- [19] Paillard M, Marie X, Renucci P, et al. Spin relaxation quenching in semiconductor quantum dots. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(8): 1634
- [20] Xu Zhongying, Xu Qiang, Zheng Baozhen, et al. Optical characterization of interface behavior in GaAs-GaAlAs multiple quantum well structures. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1990, 11(6): 416 (in Chinese) [徐仲英, 徐强, 郑宝真, 等. GaAs-GaAlAs 多量子阱界面特性的光学研究. *半导体学报*, 1990, 11(6): 416]
- [21] Tok E S, Neave J H, Fahy M R, et al. Influence of arsenic incorporation on surface morphology and Si doping in GaAs (110) homoepitaxy. *Microelectronics Journal*, 1997, 28(8~10): 833
- [22] Adachi T, Ohno Y, Matsukura F, et al. Spin relaxation in n-modulation doped GaAs/AlGaAs (110) quantum wells. *Physica E*, 2001, 10(1~3): 36
- [23] Fishman G, Lampel G. Spin relaxation of photoelectrons in p-type gallium arsenide. *Phys Rev B*, 1977, 16(2): 820
- [24] Liu L S, Wang W X, Li Z H, et al. Influence of interface interruption on spin relaxation in GaAs (110) quantum wells. *J Cryst Growth*, 2007, 301/302: 93
- [25] Dareys B, Marie X, Amand T, et al. Spin dynamics of exciton states in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells. *Superlattices and Microstructures*, 1993, 13(3): 353

Study of Electron Spin Relaxation Time in GaAs (110) Quantum Wells *

Liu Linsheng^{1,2,3}, Liu Su¹, Wang Wenxin^{2,†}, Zhao Hongming², Liu Baoli²,
Gao Hanchao², Jiang Zhongwei², Wang Jia², Huang Qing'an^{1,3},
Chen Hong², and Zhou Junming²

(1 School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3 Key Laboratory of the Ministry of Education of MEMS, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: GaAs/AlGaAs (110) multiple quantum wells (MQWs) were grown by solid source molecular beam epitaxy (MBE) with a valved arsenic cracker cell. The optical properties of the undoped GaAs (110) MQWs were studied by low-temperature photoluminescence and time-resolved photoluminescence (TRPL), which show that a strong electron spin relaxation dynamic is dependent on the excitation power and wavelength at room temperature. In this material, the predominant spin scattering mechanism [D'yakonov-Perel' (DP) mechanism] for conventional (100) QWs is substantially suppressed. The experiment data indicate that the electron-hole exchange interaction has a great impact on the spin relaxation time in GaAs (110) MQWs at room temperature.

Key words: electron spin relaxation; multiple quantum wells; molecular beam epitaxy

PACC: 6740F; 6322; 6855

Article ID: 0253-4177(2007)06-0856-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10504030) and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences, and the Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 3ZS051-A25-034)

† Corresponding author. Email: wxwang@aphy.iphf.ac.cn

Received 14 February 2007, revised manuscript received 3 April 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics